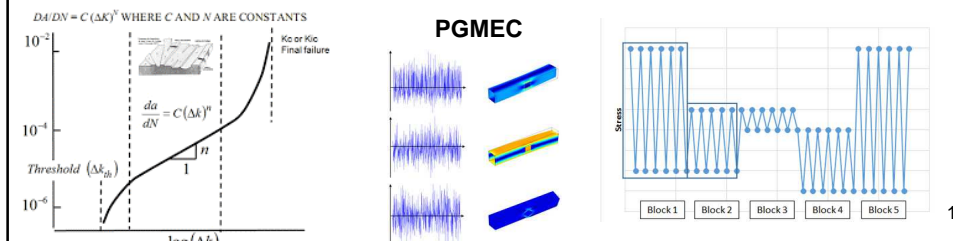


13. PROPAGAÇÃO DE TRINCAS – LEI DE PARIS

Prof. Dr. Julio Almeida

Universidade Federal do Paraná

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica



CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esforços dinâmicos complexos → Teoria de acumulação de danos.

“cada ciclo de carregamento resulta em alterações irreversíveis da estrutura do material, as quais se acumulam até atingir um valor crítico, acima do qual a vida do material fica comprometida”

REGRA DE PALMGREEN-MINER-LANGER

1924 – engenheiro sueco *Palmgren* propôs a primeira regra de previsão de vida em fadiga para solicitações não constantes, estipulando que o dano produzido a cada ciclo é linear;

3

REGRA DE PALMGREEN-MINER-LANGER

1937 – *Langer*, nos EUA, propôs essencialmente a mesma regra linear, separando porém o dano responsável pela nucleação da trinca e o dano responsável pela propagação da trinca até a fratura;

4

REGRA DE PALMGREEN-MINER-LANGER

1945 – *Miner*, também nos EUA, propôs regras lineares equivalentes à de *Palmgren*, expressando-a porém por meio da equação:

$$\sum_{k=1}^m \frac{n_k}{N_k} = 1$$

5

REGRA DE PALMGREEN-MINER-LANGER

$$\sum_{k=1}^m \frac{n_k}{N_k} = 1$$

m = número de níveis de amplitude de tensão distintos;

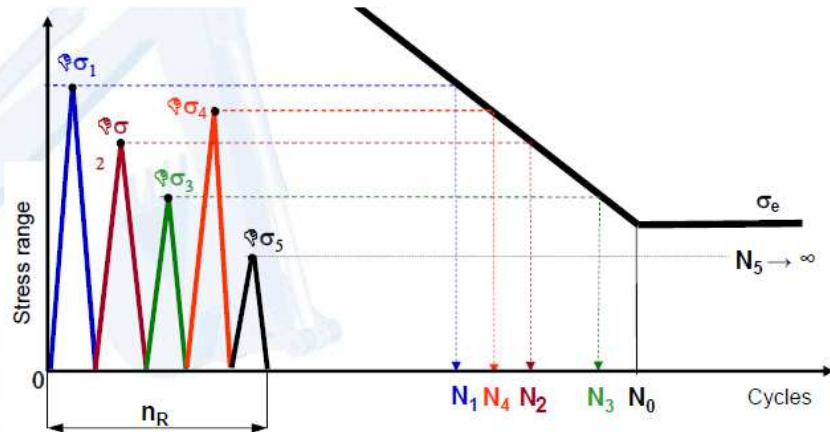
n_k = número de ciclos correspondente a cada nível de tensão;

N_k = número de ciclos para a fratura correspondente ao nível de amplitude de tensão

σ_k .

6

REGRA DE PALMGREEN-MINER-LANGER



7

PALMGREEN-MINER-LANGER - RESTRIÇÕES

A condição linear da referida regra implica que os danos realizados nos diferentes níveis de amplitude de tensão são independentes.

Em princípio, essa condição define que a ordem em que esses níveis de tensão são aplicados é irrelevante ao resultado, fato porém não confirmado experimentalmente.

8

PALMGREEN-MINER-LANGER - LIMITAÇÕES

A vida útil do componente depende da história do carregamento e será menor se as cargas de menor amplitude forem aplicadas antes das cargas de maior amplitude (*load interaction*).

9

EXEMPLO 01

A curva S-N para determinada liga é caracterizada pela relação de *Basquin*, na forma:

$$\sigma_a = CN^b$$

10

EXEMPLO 01 - continuação

Quando a amplitude de tensão é igual a resistência ao escoamento do material, sua vida em fadiga é de 1100 ciclos. Se uma amostra dessa liga passa 70% da sua vida submetida a níveis alternados de tensão iguais ao seu limite de escoamento, 20% submetida a níveis de tensão de 1,1 x seu limite de escoamento e os outros 10% submetida a 1,2 x seu limite de escoamento, estimar a vida em fadiga correspondente.

Supor um expoente $b = -0,09$ e a regra de *Palmgren-Miner*.

11

APLICAÇÃO DA MFEL NA FADIGA – EQ PARIS

Em 1962, *Paris* defendeu sua tese de doutorado, na qual a propagação de trincas de fadiga foram correlacionadas com diversos parâmetros da MFEL.

Seu trabalho propôs que a taxa de crescimento da trinca (da/dN) estaria, de forma empírica, relacionada por:

$$\Delta K = f\left(\frac{a}{W}\right)\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$$

12

APLICAÇÃO DA MFEL NA FADIGA – EQ PARIS

na forma:

$$\frac{da}{dN} = \dot{a} = C(\Delta K)^m$$

onde C, m (2 à 5) são constantes do material, medidas de forma experimental.

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) \Rightarrow \Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

13

APLICAÇÃO DA MFEL NA FADIGA – EQ PARIS

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) \Rightarrow \Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

$$K_{\max} = f\left(\frac{a}{W}\right) \sigma_{\max} \sqrt{\pi a}$$

$$K_{\min} = f\left(\frac{a}{W}\right) \sigma_{\min} \sqrt{\pi a}$$

Nota – caso o ciclo de cargas entre na região de compressão considera-se, por convenção, $K_{\min} = 0$, dado que o crescimento da trinca é diretamente influenciado pela parcela de tração de cada ciclo.

14

EQUAÇÃO DE PARIS – VALOR DAS CONSTANTES

Material	m	C (ver nota)
Aço carbono	3,3	$0,24 \cdot 10^{-11}$
Aços estruturais	3,85 - 4,20	$0,07 \cdot 10^{-11}$ a $0,11 \cdot 10^{-11}$
Ligas de alumínio	2,6 - 3,9	$3 \cdot 10^{-11}$ a $19 \cdot 10^{-11}$
Cobre	3,9	$0,34 \cdot 10^{-11}$
Titânio	4,4	$68,8 \cdot 10^{-11}$

Nota: a unidade da constante “C” é dada em $((\text{mm}/(\text{MPa}(\text{m})^{0,5})^m)$

EQUAÇÃO DE PARIS – RESTRIÇÕES

- não prevê o efeito da tensão média;
- não prevê a condição de falha estática;
- não prevê um limite de fadiga.

EQUAÇÃO DE PARIS

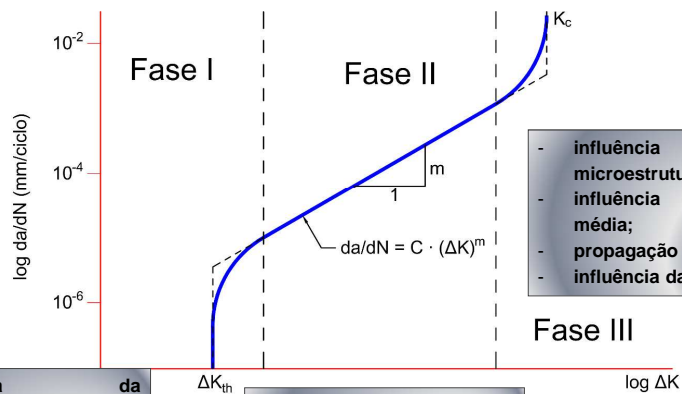
Cargas sob amplitudes variáveis:

$$\frac{da}{dN} = C \left(f \left(\frac{a}{W} \right) \Delta\sigma_{RMS} \sqrt{\pi a} \right)^m$$

$$\Delta\sigma_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta\sigma_i^2}{n}}$$

17

PROPAGAÇÃO DA TRINCA x ΔK



- influência da microestrutura material;
- influência da tensão média;
- propagação muito lenta;
- influência do ambiente.

- formação de estrias;
- regime da relação de Paris;
- propagação estável.

- influência da microestrutura material;
- influência da tensão média;
- propagação instável;
- influência da espessura.

18

PROPAGAÇÃO DA TRINCA x ΔK

$$\Delta K_{th} ?$$

- chamado de limite de sensibilidade ou limiar de propagação da trinca;
- pode levar à ocorrência de trincas estacionárias;
- taxa de crescimento da ordem de 10^{-7} mm/ciclo
- depende de “R”
- para aços carbono:

$$\Delta K_{th} = 7(1 - 0,85R) \left[MPa\sqrt{m} \right] \Rightarrow \text{para } R \geq 0,1$$

$$\Delta K_{th} = 6,0 \left[MPa\sqrt{m} \right] \Rightarrow \text{para } R < 0,1$$

19

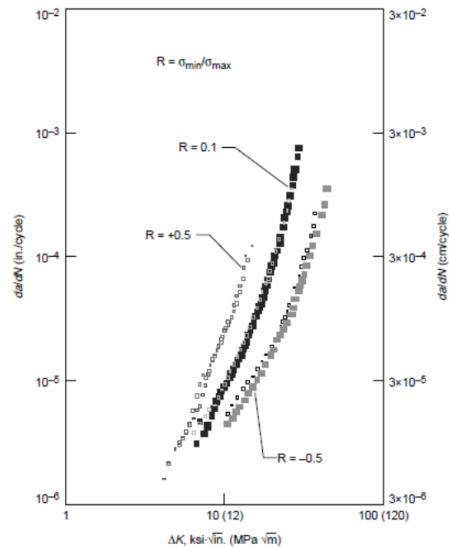
EFEITO DE “R” NO CRESCIMENTO DA TRINCA

quando o fator R aumenta, se produz um aumento no crescimento da trinca para um determinado valor de ΔK , o que se torna mais crítico para o caso de materiais frágeis.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} \quad \longrightarrow \quad R \uparrow \quad \Delta K_{th} \downarrow$$

20

EFEITO DE “R” NO CRESCIMENTO DA TRINCA



21

ESTIMATIVA DE VIDA

Cada ciclo de tensão aplicado à peça danifica a mesma um pouco mais, caracterizando um dano acumulado que pode ser representado por “da”.

Questão: a partir de que ponto uma trinca deve ser acompanhada e seu dano avaliado?

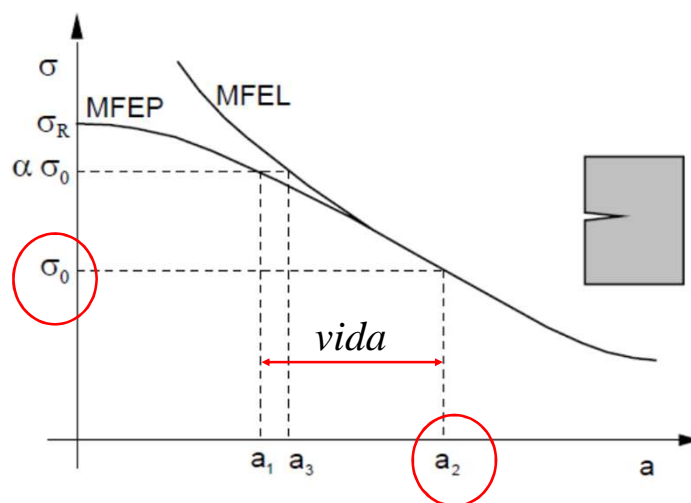
22

ESTIMATIVA DE VIDA

Função da disponibilidade e resolução dos métodos de detecção de trincas disponíveis, os quais podem ir desde a simples inspeção visual até métodos mais sofisticados como o uso de raios X e ultrassom.

23

ESTIMATIVA DE VIDA



24

ESTIMATIVA DE VIDA

Se as cargas de fadiga apresentam uma amplitude constante e o fator de forma $f(a/W)$ permanecer constante no transcorrer da propagação da trinca:

$$\int_{N_i}^{N_f} dN = N_f - N_i = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{f(\Delta K)}$$

$$\int_{N_1}^{N_2} dN = \frac{1}{C(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi})^m} \int_{a_1}^{a_2} a^{-m/2} da$$

25

ESTIMATIVA DE VIDA

$$N_f = N_2 - N_1 = \frac{1}{C(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi})^m} \left[\frac{a_1^{1-m/2} - a_2^{1-m/2}}{(m/2) - 1} \right]$$

- para $m \neq 2$

26

ESTIMATIVA DE VIDA

$$N_f = \frac{1}{C(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi})^2} \ln \left[\frac{a_2}{a_1} \right]$$

- para $m = 2$

27

CONCEITO LEAK-BEFORE-BREAK (LBB)

Projetar vasos de pressão e dutos para que a propagação de trincas através da parede ocorra antes de uma explosão catastrófica que venha a gerar uma enorme liberação de energia (gases, principalmente).

28

CONCEITO LEAK-BEFORE-BREAK (LBB)

Tal condição pode ser obtida garantindo uma trinca típica passante na parede do duto, a qual não seja crítica para disparar a condição de fratura frágil catastrófica do sistema.



29

EXEMPLO 02

Uma placa com 1,0 m de largura de aço SAE 1020, laminado à frio, é submetida a esforços cíclicos entre 200 MPa e (-50) MPa. Supor $f(a/W) = 1,12$.

Dados material:

$$m = 3$$

$$C = 10^{-11}$$

$$K_{IC} = 104 \text{MPa}\sqrt{m}$$

30

EXEMPLO 02 - continuação

Qual a vida de fadiga que pode ser esperada, se qualquer defeito na borda da chapa é detectada quando for maior do que 1 mm?

31

EXEMPLO 03

Um aço tem as seguintes propriedades: tensão de escoamento = 700 MPa, tenacidade à fratura $K_{IC} = 165$ MPa $m^{0,5}$. Uma placa ($f(a/W) = 1$) deste material contendo um fissura na borda foi testada em fadiga sob 280 MPa, $R = 0,5$ e $a_0 = 2$ mm. Observou-se experimentalmente que a propagação da trinca pode ser descrita pela relação de *Paris* na forma:

$$\frac{da}{dN} (m / ciclo) = 0,66 \times 10^{-8} (\Delta K)^{2,25}$$

32

EXEMPLO 03 - continuação

Qual é o tamanho crítico da trinca na condição de σ_{\max} ? Compute a vida em fadiga desse aço.

33

BIBLIOGRAFIA DE REFERÊNCIA

Dowling, N. E. *Mechanical Behavior of Materials – Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue*, New Jersey (2007).

Rosa, E., *Análise de Resistência Mecânica*, UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, Grupo de Análise e Projeto Mecânica, Santa Catarina (2002).

34